第 41 卷 第 6 期
2024 年 12 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1359-08

钢套管-钢纤维砂浆加固预损柱轴压性能研究

李哲,吕鑫,康树宽,王志立,翟永文

(西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安)

摘 要:为改善钢套管加固法的力学性能,引入新型加固材料钢纤维水泥砂浆,提出了钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱的新型组合结构形式。基于试验研究,利用 ABAQUS 建立了相应的加固柱计算模型并验证其合理性,并对影响此类加固柱轴压力学性能的关键因素进行了非线性参数分析。结果表明:加固柱极限承载力随钢套管厚度、钢材强度和钢纤维水泥砂浆强度的增大而提高,变化钢套管厚度对加固柱延性影响更大,而增大钢纤维水泥砂浆强度会对延性产生不利影响;采用套箍加载方式能够获得更高的承载力提升效果与变形性能;相同损伤程度情况下,变化内柱混凝土强度对加固柱性能影响很小;根据叠加原理推导了此类加固柱的轴压承载力计算公式,公式计算结果与有限元模拟结果吻合良好。

关键词:钢纤维水泥砂浆;预损;加固;有限元;承载力分析

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.016

Study on axial compression performance of predamaged columns reinforced with steel casing and steel fiber mortar

LI Zhe, LÜ Xin, KANG Shukuan, WANG Zhili, ZHAI Yongwen

(School of Civil Engineering and Architectural, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of steel casing reinforcement method, a new type of reinforced material steel fiber cement mortar is introduced, and a new type of composite structure of steel casing reinforced with steel fiber cement mortar (SFRC) is proposed. Based on the experimental research, the corresponding calculation model of the reinforced column was established by using ABAQUS and its rationality was verified, and the nonlinear parameter analysis of the key factors affecting the axial pressure performance of such reinforced column was carried out. The results show that the ultimate bearing capacity of reinforced columns increases with the increase of steel casing thickness, steel strength and steel fiber cement mortar strength, and the change of steel casing thickness has a greater impact on the ductility of reinforced columns, while the increase of steel fiber cement mortar strength has a negative impact on the ductility. The hooper loading method can obtain higher lifting effect of bearing capacity and deformation performance. With the same damage degree, the concrete strength of the inner column has little influence on

收稿日期:2021-12-19 **修回日期:**2022-10-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51608441);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2017JQ5032)
通信作者:李哲,教授。E-mail: lizhe009@163.com
引用格式:李哲,吕鑫,康树宽,等. 钢套管-钢纤维砂浆加固预损柱轴压性能研究[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1359-1366.
LI Zhe, LÜ Xin, KANG Shukuan, et al. Study on axial compression performance of predamaged columns reinforced with steel casing and steel fiber mortar[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1359-1366.

the performance of the reinforced column. Based on the superposition principle, the calculation formula of axial bearing capacity of this kind of reinforced column is derived, and the calculation results are in good agreement with the finite element simulation results.

Key words: steel fiber cement mortar; prestressing loss; reinforcement; finite element; bearing capacity analysis

钢筋混凝土柱是建筑结构中最主要的承重构件之一,在使用过程中由于自然灾害和机械磨损不可避免地出现损伤,而损伤的累积会使建筑物的可靠性大幅度降低,因此亟需采取合理的加固技术对其进行修复补强。

与传统加固方法相比,钢套管加固法具有承载力高、抗震性能好、施工便捷等优点,因此得到了国内外学者的广泛关注,并开展了大量的理论和试验研究。郑之义、SEZEN、MILLER 等[1-3]通过对比不同加固方法,发现圆钢套管加固法对加固柱力学性能的提升效果最为显著。KHAIR[4]通过试验研究,分析了钢套管全加固与套箍加固对加固柱轴压力学性能的影响。蔡健等[5]通过圆形钢套管加固 RC 柱轴压试验,提出了相应的极限承载力计算公式。刘浪、胡潇等[6-7]根据试验及有限元模拟结果建立了考虑初始轴压力作用的圆钢套管加固 RC 短柱的轴压承载力公式。何岸[8]基于试验研究,利用 ABAQUS 建立了考虑泊松比变化的有限元计算模型。卢亦焱等[9-10]对钢管自密实混凝土加固 RC 柱的轴压工作机理与力学性能进行了大量的理论与试验研究。

上述研究均证实了钢套管加固法所具有的优越性能,但改造旧建筑还需要考虑结构柱可能存在的不同损伤,就需要研究损伤对钢套管加固法的影响。同时,钢纤维水泥砂浆作为新型加固材料,其中钢纤维的存在能够阻碍砂浆内部微裂缝的开展,且能有效改善结构的抗剪、抗弯强度[11],作为灌浆材料不仅可以改善损伤内柱的延性,而且还能够延缓钢套管的屈曲变形。

基于此,提出钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱的新型组合结构,并进行了轴压试验研究,但试验基于各种条件的限制,考虑的影响因素并不全面。因此,利用 ABAQUS 建立相应的加固柱计算模型并验证其合理性,并对影响此类加固柱轴压力学性能的关键因素进行非线性参数分析。基于试验及有限元模拟结果提出此类加固柱的轴压承载力计算公式,以期为此类加固柱在实际工程中的应用提供参考,并进一步完善钢套管加固技术。

1 试验概述

试验以混凝土离散性、损伤程度和钢套管厚度为影响因素,共设计制作了 7 根 SFRC 试件(SFRC 试件表示钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱),试件设计参数如表 1 所示。其中,RC 柱的预损效果采用轴压加载方式施加,参考《混凝土结构加固设计规范》[12],将 RC 柱损伤程度指标分为 3 个等级:以加载至普通 RC 柱极限荷载的 60%、80% 和 100% 分别作为 RC 柱的一级损伤、二级损伤和三级损伤程度。

RC 柱高 $H = 1\,000$ mm,直径 $D = 150$ mm。混凝土强度等级为 C40,测得混凝土立方体抗压强度为 49.8 MPa。纵筋选用 6 根直径为 12 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋选用直径为 6 mm 的 HPB300 级钢筋。除圆柱上下两端箍筋加密区的箍筋间距为 100 mm,其余箍筋间距均为 150 mm。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of the specimen

预损柱编号	损伤程度/%	混凝土强度	柱高/mm	管厚/mm	加固柱编号
RC-1	100	C40	1 000	4	SFRC-7
RC-2	80	C40	1 000	4	SFRC-2
RC-3	80	C40	1 000	4	SFRC-3
RC-4	80	C40	1 000	2	SFRC-4
RC-5	80	C40	1 000	6	SFRC-5
RC-6	80	C40	1 000	4	SFRC-1
RC-7	60	C40	1 000	4	SFRC-6

注:SFRC 表示钢套管-钢纤维水泥砂浆复合加固柱。

预损柱加固处理流程如图 1 所示。首先对预损柱表面进行凿毛处理,然后将预损柱和钢套管固定在底座相应预留位置,最后浇筑钢纤维水泥砂浆使二者形成一个整体加固柱。

SFRC 采用全加固方式。试验所用钢材类别为 Q235 低碳钢,为了保证钢套管与 RC 柱之间有足够距离来浇筑一定厚度的钢纤维水泥砂浆,取钢套管内径为 250 mm。钢套管名义厚度为 2、4、6 mm,实测

厚度分别为 1.83、3.87、5.75 mm，钢材力学性能指标如表 2 所示。钢纤维采用长度为 35 mm、直径为 0.75 mm 的冷拔钢丝端钩型钢纤维，体积掺量为 0.5%，并测得钢纤维水泥砂浆立方体抗压强度为 72.1 MPa。试验加载装置及加载制度与文献[13]一致。

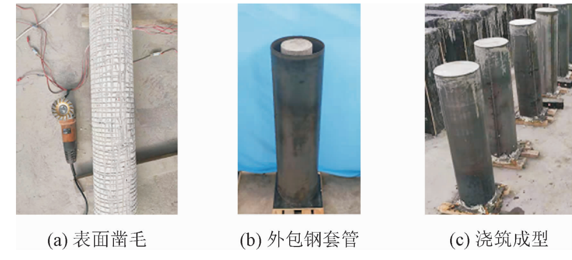


图 1　预损柱加固流程图

Fig. 1　Flow chart of reinforcement of pre-damaged column

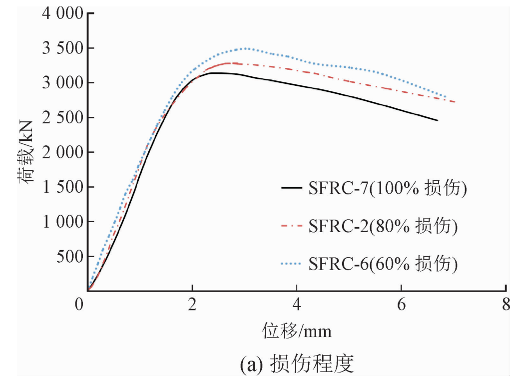
表 2　钢材力学性能指标

Tab. 2　Mechanical properties of steel

钢材类型	钢筋直径/mm	套管管厚/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
HPB300	6	–	226.5	317.1	2.1×10^5
HRB400	12	–	369.3	530.6	2.0×10^5
Q235	–	2	357.35	420.20	2.12×10^5
	–	4	270.62	415.28	1.95×10^5
	–	6	246.45	352.43	1.94×10^5

2　试验结果分析

通过试验研究得出不同因素对加固柱荷载-位移曲线的影响，结果如图 2 所示。管厚相同时，内 RC 柱损伤程度越低，加固柱极限承载力越高，相比于 100% 损伤加固柱，80% 损伤和 60% 损伤加固柱承载力分别提高了 4.5% 和 11.2%；增大管厚可有效提高加固柱极限承载力并改善其延性；图 2(c) 中 3 条曲线几乎重合，表明混凝土离散性对此类加固柱轴压力学性能影响很小，可忽略不计。



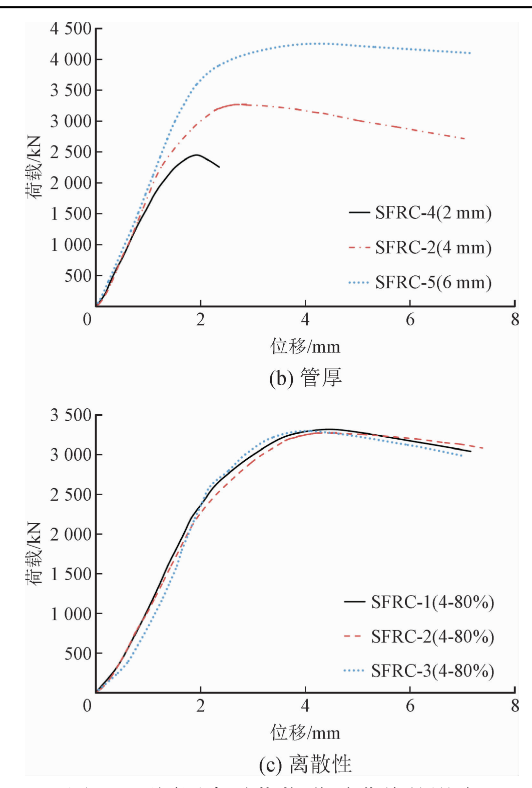


图 2　不同因素对荷载-位移曲线的影响

Fig. 2　Influence of different factors on load-displacement curve

3　模型建立与验证

3.1　材料本构模型的选取

基于试验研究，利用 ABAQUS 软件进行数值模拟分析。其中，核心混凝土与钢纤维水泥砂浆均采用文献[14]中的约束混凝土应力-应变关系，本构模型选择塑性损伤模型，损伤因子基于 Sidiroff 能量等价原理确定[15]。钢垫板在本模型中仅起传力作用，因此选用线弹性本构模型。钢筋采用双斜线模型，强化段弹性模量取为线弹性段弹性模量的 0.01 倍。钢套管采用五阶段形式的二次流塑本构模型，如图 3 所示，本构关系如式(1)所示。

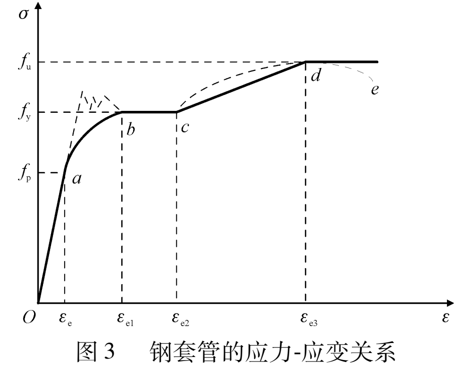


图 3　钢套管的应力-应变关系

Fig. 3　Stress-strain relationship of steel casing

$$\sigma_s=\begin{cases}E_s\varepsilon_s & \varepsilon_s\leqslant\varepsilon_e\\ -A\varepsilon_s^2+B\varepsilon_s+C & \varepsilon_e<\varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e1}\\ f_y & \varepsilon_{e1}<\varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e2}\\ f_y\left(1+0.6\dfrac{\varepsilon_s-\varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3}-\varepsilon_{e2}}\right) & \varepsilon_{e2}<\varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e3}\\ 1.6f_y & \varepsilon_s>\varepsilon_{e3}\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ_s、ε_s 为钢材应力、应变；f_y、E_s 为钢材屈服强度、弹性模量；ε_e 为比例极限所对应的应变；$\varepsilon_e=0.8f_y/E_s$，$\varepsilon_{e1}=1.5\varepsilon_e$，$\varepsilon_{e2}=10\varepsilon_{e1}$，$\varepsilon_{e3}=100\varepsilon_{e1}$；$A$、$B$、$C$ 为拟合系数，其中 $A=0.2f_y/(\varepsilon_{e1}-\varepsilon_2)^2$，$B=2A\varepsilon_{e1}$，$C=0.8f_y+A\varepsilon_e^2-B\varepsilon_e$。

3.2　有限元模型的建立

单元类型选取：钢套管因沿厚度方向的尺寸远小于其他两维尺寸，且垂直于厚度方向的应力可以忽略不计，因此采用 4 节点减缩积分壳单元（S4R）；RC 柱中的纵筋与箍筋采用 2 节点桁架单元（T3D2）；钢垫板、核心混凝土及钢纤维水泥砂浆均采用 8 节点减缩积分实体单元（C3D8R）。

网格划分：采用试算方法确定合理的模型网格尺寸，其中垫板与钢筋骨架采用全局种子布置，尺寸均为 25 mm；原 RC 柱与钢纤维水泥砂浆加固层纵向尺寸分别为 20 mm 和 30 mm。为了使原 RC 柱、钢纤维水泥砂浆加固层和钢套管在横截面方向的网格对齐，各部件上下两端采用局部种子布置，个数均为 28 个。

相互作用关系：钢筋骨架嵌入约束至混凝土柱中；钢垫块与混凝土柱、钢纤维水泥砂浆加固层交界面采用面-面接触关系，而钢套管与钢垫块交界面采用壳-实体耦合的连接方式；原 RC 柱与钢纤维水泥砂浆交界面采用绑定约束；为了方便加载，在上端垫板上设置一参照点 $X^{RP\text{-}1}$，并将该参照点与上端垫板上表面进行耦合约束；钢套管与钢纤维水泥砂浆交界面采用法向硬接触，切向库伦摩擦模型的面-面接触关系，摩擦系数取 0.6。

边界条件：上垫板顶面约束 X 和 Y 方向的平动自由度，下垫板底面采用固定边界条件。荷载的施加采用力-位移混合加载形式，通过上端垫板参照点 $X^{RP\text{-}1}$ 进行纵向加载。

预损 RC 柱的制作：分别通过轴压加载至试验 RC 柱峰值荷载的 60%、80% 和 100%，然后再卸载的加载方式来制作损伤程度为一级、二级和三级的预损柱模型。相应的损伤应力云图如图 4 所示，损伤情况与试验结果吻合较好。

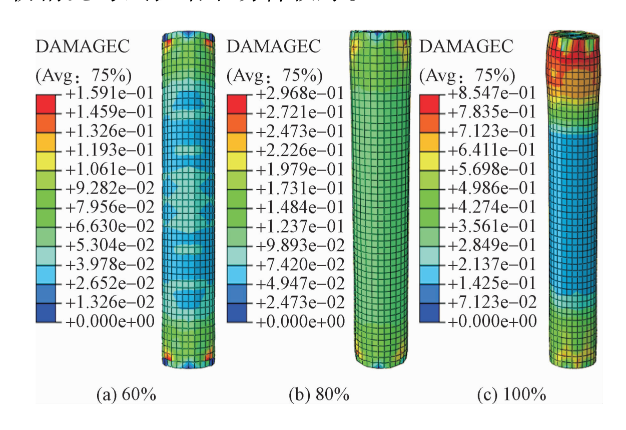


图 4　RC 柱受压损伤应力云图

Fig. 4　The compressive damage stress nephogram of RC columns

最终建立的有限元模型如图 5 所示。

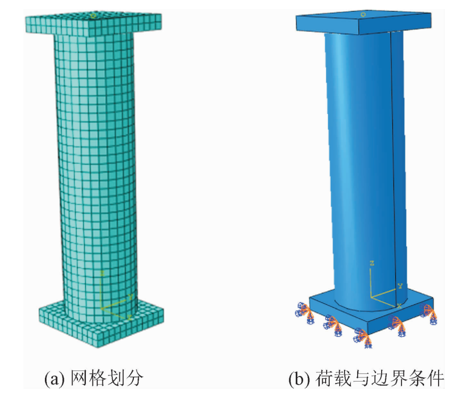


图 5　有限元模型

Fig. 5　Finite element model

3.3　有限元结果对比分析

图 6 为典型试件（SFRC-7）破坏形态对比图，通过对比发现模拟柱与试验柱破坏形态较为吻合，均表现为试件中部及中上部鼓曲变形。

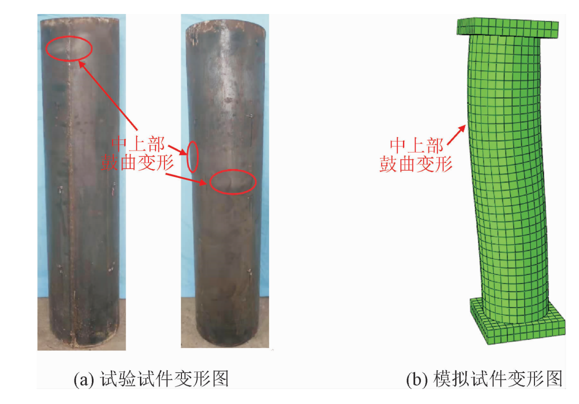


图 6　变形图对比

Fig. 6　Comparison of deformation diagrams

由于数值模拟是在理想状态下进行，“诸多理想

化的假定”“未考虑试验过程中可能存在的各种因素影响”都会导致模拟结果与试验结果存在一定偏差。

图 7 为各试件荷载-位移曲线对比图。其中，SFRC-1、SFRC-2、SFRC-3 为考虑“离散性”的 3 个试件，所有设计参数均相同，所建立的有限元计算模型也完全相同，因此只以 SFRC-2 为例进行了数值模拟分析。通过对比能够发现试验与模拟曲线具有相近的变化规律：加载初期，核心材料未与钢套管接触，加固柱各部件处于各自独立工作状态，应力-应变呈线性发展趋势；当荷载达到极限荷载的 70% 左右，试件进入弹塑性发展阶段，材料的屈服导致加固柱刚度降低，荷载-位移曲线斜率变缓；峰值荷载后，试件承载力随位移增大呈缓慢下降趋势，加固柱表现出较好的延性。

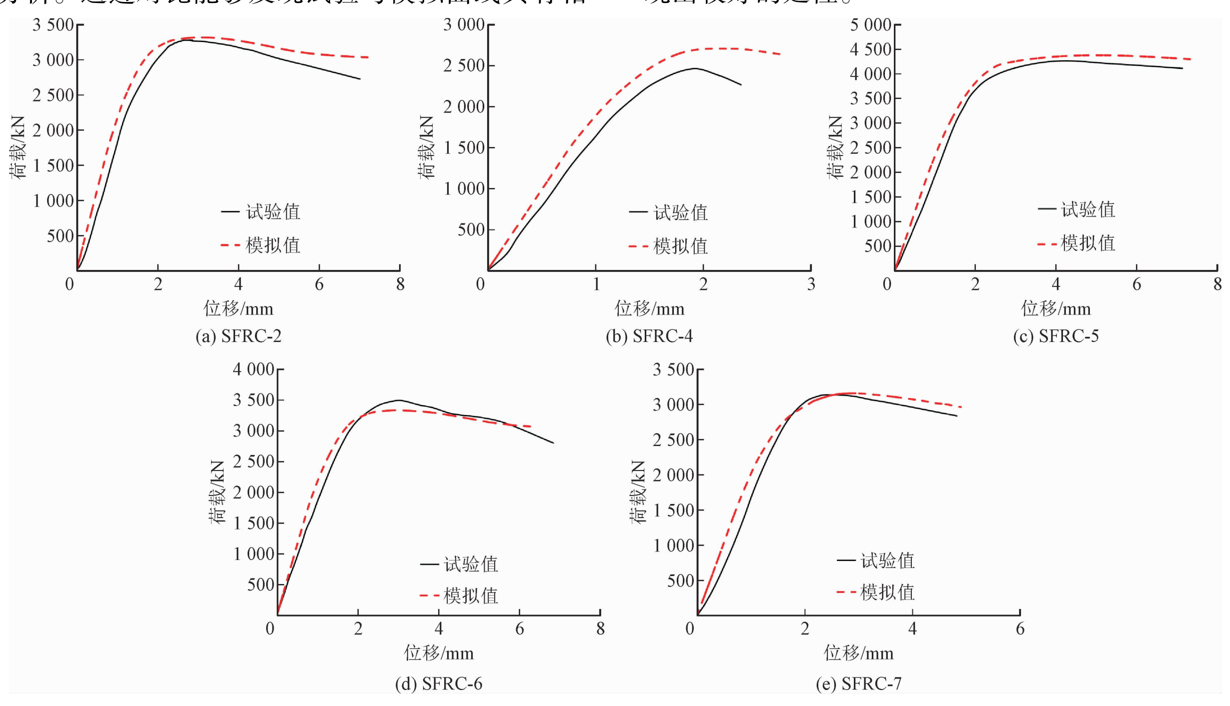


图 7　荷载-位移曲线对比

Fig. 7　Comparison of load-displacement curves

表 3 为 SFRC 试件轴压承载力对比表，通过计算得到模拟承载力与试验承载力比值的误差平均值为 1.01，方差为 0.001 6，二者吻合较好。

表 3　试验承载力与模拟承载力对比

Tab. 3　Comparison of tested bearing capacity with simulated bearing capacity

试件编号	管厚/mm	损伤程度	试验 N_s/kN	模拟 N_t/kN	误差 N_t/N_s
SFRC-1	4	80%	3 316.5	3 311.3	1.00
SFRC-2	4	80%	3 274.6	3 311.3	1.01
SFRC-3	4	80%	3 293.2	3 311.3	1.01
SFRC-4	2	80%	2 454.0	2 699.0	1.10
SFRC-5	6	80%	4 256.1	4 371.5	1.03
SFRC-6	4	60%	3 482.0	3 321.2	0.95
SFRC-7	4	100%	3 132.4	3 154.5	1.01
				平均值	1.01
				方差	0.001 6

通过上述对比结果能够证明所建有限元计算模型的合理性与正确性，因此可采用该计算模型来分析研究钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱的轴压力学性能。

4　非线性参数分析

基于前述建立的计算模型，对影响此类加固柱的关键因素进行变参数分析，共计 19 个模型，主要影响因素及相应变参取值如表 4 所示。不同影响因素对应变参加固柱的荷载-位移曲线对比如图 8 所示。

表 4　非线性参数分析取值

Tab. 4　Value of nonlinear parameter analysis

影响因素	变参取值
钢套管厚度/mm	3，4，5，7，8
钢材等级	Q275，Q345，Q390，Q420
加载方式	非对称加载，套箍加载
灌浆料立方体抗压强度/MPa	30，40，50，60
混凝土强度等级	C30，C35，C45，C50

增大管厚增强了钢套管对核心材料的约束作用,核心材料抗压强度得到提升,各材料力学性能得到充分发挥,继而 SFRC 轴压承载力和延性得到提高与改善(图 8a)。

增大钢材强度能够提高 SFRC 的轴压承载力,但相对于增加管厚,钢套管约束效应提升较小,因此加固柱所得到的承载力提升效果较弱。改变钢材强度对 SFRC 初始刚度和延性影响较小(图 8b)。

全面加载(Q)、非对称加载(F)、套箍加载(T)方式对荷载-位移曲线的影响如图 8(c)所示。相对于全截面加载,采用非对称、套箍加载时,SFRC 的轴压承载力分别提高了 10.6% 和 18.7%,同时延性也得到明显改善。随加载方式从全截面加载转变成非对称加载,再到套箍加载,钢套管所发挥的作用也从纵向承载转变成仅提供横向约束作用,SFRC 能更充分地发挥各材料力学性能,因此在承载能力和延性上表现更为优异。

变化钢纤维水泥砂浆强度能够提高 SFRC 的轴压承载力,从 30 MPa 增至 72.1 MPa,SFRC 轴压承载力提高了 21.8%。但增加钢纤维水泥砂浆强度会对延性产生不利影响,是由于钢纤维水泥砂浆强度的提高,其在三向受压情况下又获得了承载力提升,强度越大则变形小、延性差,易发生脆性剪切破坏,因此曲线下降段斜率更陡(图 8d)。

变化混凝土强度对 SFRC 的轴压承载力提升并不明显,最大仅有 4.8%(从 C30 提高至 C50),对延性也几乎不产生影响(图 8e)。

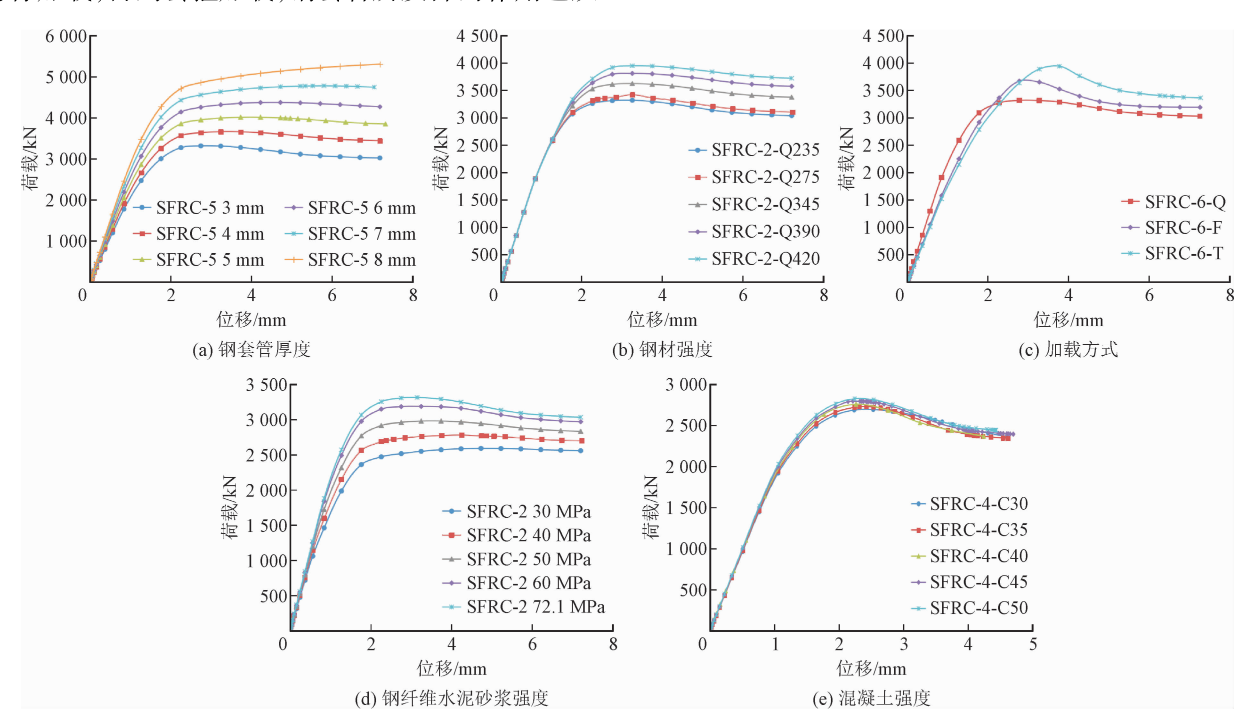


图 8 不同因素对加固柱荷载-位移曲线的影响

Fig. 8 Influence of different factors on load-displacement curve of reinforced column

5 轴压承载力计算公式

基于试验和有限元模拟结果,根据叠加原理并考虑内柱损伤程度、加载方式以及钢套管约束效应对加固柱极限承载力的影响,推导钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱的轴压承载力计算公式。其中,钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱可以分解成钢套管、钢纤维水泥砂浆加固层、混凝土柱及钢筋骨架 4 部分,如图 9 所示。

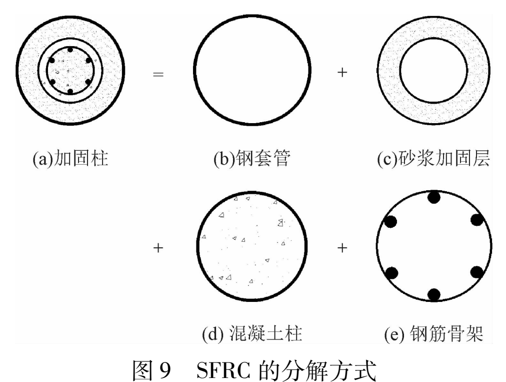


图 9 SFRC 的分解方式

Fig. 9 The decomposition of SFRC

若不考虑材料之间的相互作用，仅采用承载力叠加，得到 SFRC 轴压承载力计算公式为

$$N = A_s f_y + A_{ty} f_{ty} + A_{c1} f_{c1} + A_{c2} f_{c2} \quad (2)$$

式中：A_s、f_y 为纵筋截面积、屈服强度；A_{ty}、f_{ty} 为钢套管截面积、屈服强度；A_{c1}、f_{c1} 为混凝土截面积、轴心抗压强度；A_{c2}、f_{c2} 为钢纤维水泥砂浆截面积、轴心抗压强度。

然而采用式(2)计算得到的轴压承载力显然要比实际值小，因为这与钢套管-钢纤维水泥砂浆加固法的加固原理并不相符。这种加固方法的最大优势是利用钢套管对核心材料提供横向约束作用，使核心材料处于三向受压应力状态，各部分材料的性能均能得到充分利用，继而加固柱的承载力和延性得到提高与改善。因此，对式(2)进行修正，引入材料强度增大系数 α 表征钢套管约束对核心材料抗压承载力的提高，引入损伤系数 φ 表征预损伤对 RC 柱强度的折减。修正后 SFRC 的轴压承载力计算公式为

$$N_u = A_s f_y + A_{ty} f_{ty} + \alpha(\varphi A_{c1} f_{c1} + A_{c2} f_{c2}) \quad (3)$$

利用 ABAQUS 查取极限状态时钢纤维水泥砂浆加固层的轴压力，即得到 $\alpha A_{c2} f_{c2}$ 的数值，通过反算可求出对应的 α 值。对数据进行整理得到 α 与 ξ ($\xi = A_{ty} f_{ty} / (A_{c1} f_{c1} + A_{c2} f_{c2})$) 的关系（图 10），拟合出 ξ 与 α 的关系为

$$\alpha = 1 + 0.615\,9\xi^{0.601\,5} \quad (0.361 \leqslant \xi \leqslant 0.989) \quad (4)$$

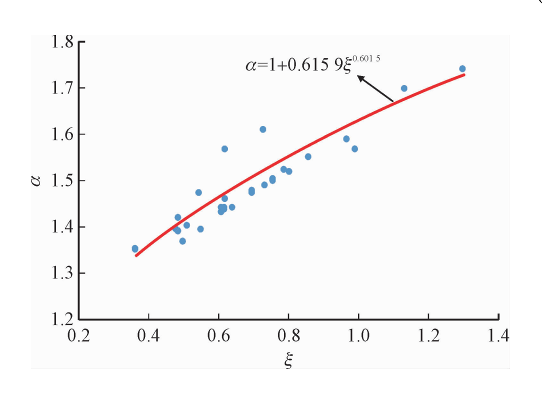


图 10　ξ 与 α 的关系图

Fig. 10　The diagram of ξ and α

求出 α 后，式(3)中只剩一个未知量 φ。根据模拟结果，取一组 60% 损伤、80% 损伤及 100% 损伤的 SFRC 极限承载力进行反算，求出损伤系数 φ，并拟合出 ω 与 φ 的关系式（一级损伤时 $\omega = 0.6$、二级损伤时 $\omega = 0.8$、三级损伤时 $\omega = 1$），如式(5)所示。

$$\varphi = -1.751\,7\omega^2 + 1.259\,8\omega + 0.735\,8 \quad (5)$$

改变加载方式对 SFRC 轴压承载力的影响也是十分显著的，因此对式(3)进行补充，引入套箍利用系数 ψ，并通过模拟数据拟合出不同加载方式下 ξ 与 ψ 的关系式，如式(6)所示。非对称加载方式(F)、套箍加载方式(T)下 ξ 与 ψ 的关系分别如图 11、12 所示。

$$\begin{cases} \psi = 1 & \text{Q} \\ \psi = -0.007\,7\xi^2 + 0.246\,8\xi + 0.988\,6 & \text{F} \\ \psi = -0.064\,4\xi^2 + 0.237\,6\xi + 1.094\,4 & \text{T} \end{cases} \quad (6)$$

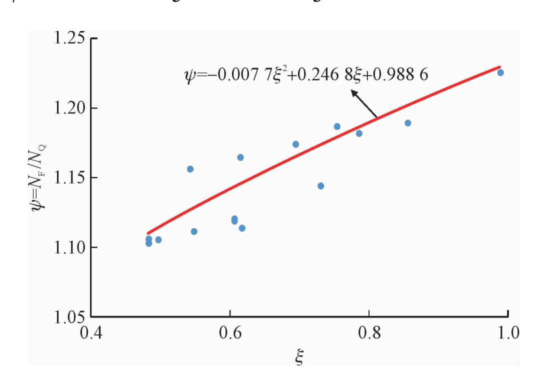


图 11　非对称加载方式下 ξ 与 ψ 的关系图

Fig. 11　The relationship between ξ and ψ under asymmetric loading

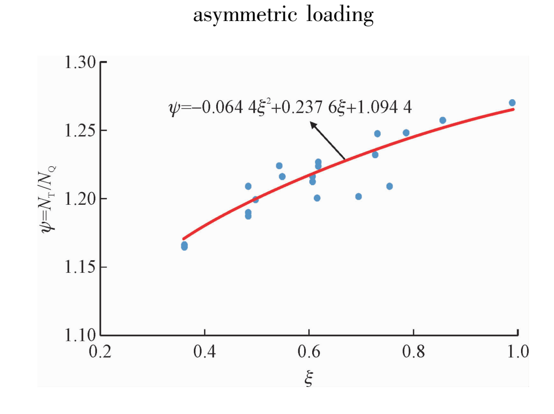


图 12　套箍加载方式下 ξ 与 ψ 的关系图

Fig. 12　The relationship between ξ and ψ under hoop loading

综上所述，SFRC 的轴压承载力计算公式为

$$N_u = \psi[A_s f_y + A_{ty} f_{ty} + \alpha(\varphi A_{c1} f_{c1} + A_{c2} f_{c2})] \quad (7)$$

采用式(7)得到轴压承载力计算结果与试验及模拟结果之比的误差为 0.94～1.06（图 13），误差平均值、标准差分别为 1.007、0.033，两者吻合较好。式(7)目前可适用于以钢套管、灌浆材料组成的加固构件加固钢筋混凝土柱方面，对是否应用于其他加固方法仍需进一步探讨。

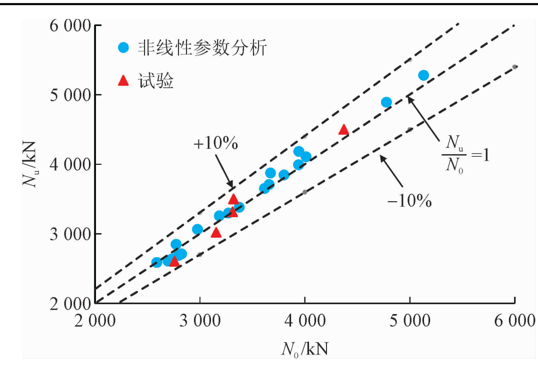


图 13 式(6)计算值与试验及有限元模拟结果的对比

Fig. 13 Comparison of calculated value of formula (6) with experimental and finite element simulation results

6 结 论

1)SFRC 的轴压承载力随钢套管厚度、钢材屈服强度的增大而不断提高,但承载力提升效果是逐渐减弱的;相比于增加钢材屈服强度,增大钢套管厚度可以使 SFRC 获得更高的承载力提升效果;增大钢套管厚度能使 SFRC 延性得到显著改善,但改变钢材强度对 SFRC 延性几乎不产生影响。

2)相对于全截面加载方式,采用套箍加载方式时 SFRC 更能发挥钢套管的横向约束作用,极限承载力相比于全截面加载方式提高了 18.7%,同时延性也得到有效改善。

3)SFRC 轴压承载力随钢纤维水泥砂浆强度的增大呈线性提高趋势,但承载力提升效果随钢纤维水泥砂浆强度的提高逐渐减弱;增大钢纤维水泥砂浆强度会对 SFRC 的延性产生不利影响。

4)改变 RC 柱混凝土强度对 SFRC 的轴压承载力与延性影响不大。

5)基于叠加原理推导了 SFRC 的轴压承载力计算公式,公式计算结果与有限元模拟结果吻合良好,可为此类加固方法应用于工程设计和推广提供参考。

参考文献:

[1] 郑之义.不同加固方式的震损 RC 柱抗震性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2018.

[2] SEZEN H, MILLER E A. Experimental evaluation of axial behavior of strengthened circular reinforced-concrete columns[J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(2): 238-247.

[3] MILLER E A. Experimental research of reinforced concrete column strengthening methods[D]. Columbus: Ohio State University, 2006.

[4] KHAIR B. Retrofitting of square reinforced concrete columns subjected to concentric axial loading with steel jackets[C]//The Third Engineering Consultant Work Conference[S. l.]: [s. n.], 2009.

[5] 蔡健,徐进.圆形钢套管加固混凝土柱的极限承载力[J].华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(10):78-83.
CAI Jian, XU Jin. Ultimate strength of reinforced concrete columns strengthened by circular steel jacketing[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2007, 35(10): 78-83 (in Chinese).

[6] 刘浪.二次受力下圆形钢套管加固钢筋混凝土短柱轴心受压性能研究[D].成都:成都理工大学,2016.

[7] 胡潇,钱永久.考虑二次受力圆形钢套管加固钢筋混凝土短柱轴心受压承载力研究[J].工程抗震与加固改造,2013,35(5):36-41.
HU Xiao, QIAN Yongjiu. Study of bearing capacity of reinforced concrete short column strengthened by circular steel tube under axial loading considering twice loading[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2013, 35(5): 36-41 (in Chinese).

[8] 何岸.钢套管再生混凝土加固柱力学性能研究[D].广州:华南理工大学,2017.

[9] 卢亦焱,龚田牛,张学朋,等.外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆柱轴压受力分析[J].工程力学,2013,30(9):158-165.
LU Yiyan, GONG Tianniu, ZHANG Xuepeng, et al. Theoretical analysis of circular RC column strengthened with self-compacting concrete filled circular steel jacket under axial loading[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(9): 158-165 (in Chinese).

[10] 卢亦焱,薛继锋,张学朋,等.外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土中长圆柱轴压性能试验研究[J].土木工程学报,2013,46(2):100-107.
LU Yiyan, XUE Jifeng, ZHANG Xuepeng, et al. Experimental study on the behavior of middle long RC column strengthened by self-compacting concrete and steel tube under the axial load[J]. China civil engineering journal, 2013, 46(2): 100-107 (in Chinese).

[11] 李政,宋晓明.钢纤维水泥砂浆力学行为研究[J].科技视界,2013(16):5,82.
LI Zheng, SONG Xiaoming. Research on mechanical behavior of steel fiber cement mortar[J]. Science & technology vision, 2013, 2013(16): 5, 82 (in Chinese).

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[13] 冯学伟.圆钢套管-钢纤维水泥砂浆外包加固预损 RC 柱轴压性能研究[D].西安:西安理工大学,2020.

[14] 田连波,侯建国. ABAQUS 中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2015,37(4):340-345.
TIAN Lianbo, HOU Jianguo. Reasonable plastic damaged factor of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Journal of Hubei University (natural science), 2015, 37(4): 340-345 (in Chinese).

[15] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通出版社,2003.

(编辑 张璐)